



Docket No.: MUH-12777

I hereby certify that this correspondence is being deposited with the United States Postal Service with sufficient postage as first class mail in an envelope addressed to: Commissioner for Patents, Alexandria, VA 22313 20231.

By:  Date: December 9, 2003

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applic. No. : 10/667,730
Applicant : Georg Schmidt et al.
Filed : September 22, 2003
Art Unit : to be assigned
Examiner : to be assigned

Docket No. : MUH-12777
Customer No.: 24131

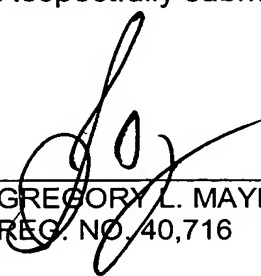
CLAIM FOR PRIORITY

Mail Stop: Missing Parts
Hon. Commissioner for Patents,
Alexandria, VA 22313-1450
Sir:

Claim is hereby made for a right of priority under Title 35, U.S. Code, Section 119, based upon the German Patent Applications 101 13 495.9 filed March 20, 2001 and 101 14 963.8 filed March 27, 2001.

A certified copy of the above-mentioned foreign patent application is being submitted herewith.

Respectfully submitted,



GREGORY L. MAYBACK
REG. NO. 40,716

Date: December 9, 2003

Lerner and Greenberg, P.A.
Post Office Box 2480
Hollywood, FL 33022-2480
Tel: (954) 925-1100
Fax: (954) 925-1101

/mjb



\$CC

Docket No.: MUH-12777

I hereby certify that this correspondence is being deposited with the United States Postal Service with sufficient postage as first class mail in an envelope addressed to: Commissioner for Patents, P.O. Box 1450, Alexandria, VA 22313-1450

By: 

Date: December 9, 2003

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applic. No. : 10/667,730
Applicant : Georg Schmidt et al.
Filed : September 22, 2003
Art Unit : to be assigned
Examiner : to be assigned

Docket No. : MUH-12777
Customer No.: 24131

LETTER

Mail Stop: Missing Parts
Hon. Commissioner for Patents,
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

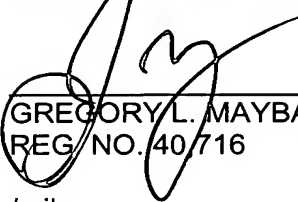
The above-mentioned new patent application was filed on September 22, 2003 without a signed oath or declaration, under the provision of 37 C.F.R. 1.53(f).

In accordance with the above-mentioned rule, enclosed herewith is the original signed declaration.

The undersigned hereby states that the application filed in the Patent and Trademark Office is the application which the inventor(s) executed by signing the declaration. MPEP 602 (8th ed., Aug. 2001).

The fee required for the late filing of an oath or declaration in the amount of \$130.00 is also enclosed.

Respectfully submitted,



GREGORY L. MAYBACK
REG. NO. 40/716

/mjb

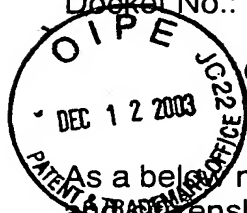
Date: December 9, 2003
Lerner and Greenberg, P.A.
Post Office Box 2480
Hollywood, FL 33022-2480
Tel: (954) 925-1100
Fax: (954) 925-1101

12/17/2003 HLE333 00000051 10667730

01 FC:1051

130.00 00

Docket No.: MUH-12777



COMBINED DECLARATION AND POWER OF ATTORNEY
IN ORIGINAL APPLICATION

As a below named inventor, I hereby declare that: my residence, post office address and citizenship are as stated below next to my name; that I verily believe that I am the original, first and sole inventor (if only one name is listed below) or an original, first and joint inventor (if plural names are listed below) of the subject matter which is claimed and for which a patent is sought on the invention entitled:

SEMICONDUCTOR ELEMENT HAVING A SEMI-MAGNETIC CONTACT

described and claimed in the specification bearing that title, that I understand the content of the specification, that I do not know and do not believe the same was ever known or used in the United States of America before my or our invention thereof, or patented or described in any printed publication in any country before my or our invention thereof or more than one year prior to this application, that the same was not in public use or on sale in the United States of America more than one year prior to this application, that the invention has not been patented or made the subject of an inventor's certificate issued before the date of this application in any country foreign to the United States of America on an application filed by me or my legal representatives or assigns more than twelve months prior to this application, that I acknowledge the duty to disclose to the Office all information known to me to be material to patentability as defined in 37 CFR § 1.56, and that no application for patent or inventor's certificate of this invention has been filed earlier than the following in any country foreign to the United States prior to this application by me or my legal representatives or assigns:

German Application 101 13 495.9, filed March 20, 2001 and German Application 101 14 963.8, filed March 27, 2001, the International Priority of which are claimed under 35 U.S.C. § 119; and International Application PCT/DE02/00989, filed March 19, 2002, the Priority of which is claimed under 35 U.S.C. § 120.

I hereby appoint the following attorney(s) and/or agent(s) to prosecute this application and to transact all business in the Patent and Trademark Office connected therewith:

LAURENCE A. GREENBERG (Reg. No. 29,308)
WERNER H. STEMER (Reg. No. 34,956)
RALPH E. LOCHER (Reg. No. 41,947)
GREGORY L. MAYBACK (Reg. No. 40,719)

Address all correspondence and telephone calls to:

LERNER AND GREENBERG, P.A.
POST OFFICE BOX 2480
HOLLYWOOD, FLORIDA 33022-2480
Tel: (954) 925-1100
Fax: (954) 925-1101

I hereby state that I have reviewed and understand the contents of the above-identified specification, including the claims, as amended by any amendment referred to above.

I hereby declare that all statements made herein of my own knowledge are true and that all statements made on information and belief are believed to be true; and further that these statements were made with the knowledge that willful false statements and the like so made are punishable by fine or imprisonment, or both, under Section 1001 Title 18 of the United States Code and that such willful false statements may jeopardize the validity of the application or any patent issued thereon.

FULL NAME OF FIRST JOINT INVENTOR:

GEORG SCHMIDT


Inventor's Signature

14.11.03
Date

Residence: LINDFLUR, GERMANY

Country of Citizenship: GERMANY

Post Office Address: SCHELLENBERG 10
D-97234 LINDFLUR
GERMANY

FULL NAME OF SECOND JOINT INVENTOR:

LAURENS MOLENKAMP

Inventor's Signature

Date

Residence: WÜRZBURG, GERMANY

Country of Citizenship: THE NETHERLANDS

Post Office Address: OBERER NEUBERGER WEG 1
D-97074 WÜRZBURG
GERMANY

I hereby state that I have reviewed and understand the contents of the above-identified specification, including the claims, as amended by any amendment referred to above.

I hereby declare that all statements made herein of my own knowledge are true and that all statements made on information and belief are believed to be true; and further that these statements were made with the knowledge that willful false statements and the like so made are punishable by fine or imprisonment, or both, under Section 1001 Title 18 of the United States Code and that such willful false statements may jeopardize the validity of the application or any patent issued thereon.

FULL NAME OF FIRST JOINT INVENTOR:

GEORG SCHMIDT

Inventor's Signature

Date

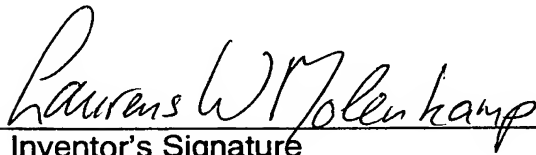
Residence: LINDFLUR, GERMANY

Country of Citizenship: GERMANY

Post Office Address: SCHELLENBERG 10
D-97234 LINDFLUR
GERMANY

FULL NAME OF SECOND JOINT INVENTOR:

LAURENS MOLENKAMP



Inventor's Signature

Date 20/10/2003

Residence: WÜRZBURG, GERMANY

Country of Citizenship: THE NETHERLANDS

Post Office Address: OBERER NEUBERGER WEG 1
D-97074 WÜRZBURG
GERMANY

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

Aktenzeichen: 101 13 495.9

Anmeldetag: 20. März 2001

Anmelder/Inhaber: Infineon Technologies AG, München/DE

Bezeichnung: Halbleiterbauelement mit einem semimagnetischen Kontakt

IPC: H 01 L, G 11 C

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 22. Oktober 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag



Wehner

MÜLLER & HOFFMANN – PATENTANWÄLTE

European Patent Attorneys – European Trademark Attorneys

Innere Wiener Strasse 17
D-81667 München

Anwaltsakte: 11194

Ko/Rb/rg

Anmelderzeichen: 2001 04649
(2001 E 04603 DE)

20.03.2001

Infineon Technologies AG
St. Martin-Straße 53

81669 München

Halbleiterbauelement mit einem semimagnetischen Kontakt

Beschreibung

Halbleiterelement mit einem semimagnetischen Kontakt

5 Die Erfindung betrifft ein magnetoresistives Halbleiterelement, sowie ein Speicherelement, einen Feldeffekttransistor und eine Vorrichtung zum Auslesen von in magnetischen Speichermedien gespeicherten Informationen, welche jeweils das magnetoresistive Halbleiterelement umfassen.

10

Die Magnetoelektronik und der spinpolarisierte Transport von Ladungsträgern haben im letzten Jahrzehnt eine rasante Entwicklung durchgemacht. Diese Entwicklung wurde vor allem durch die Entdeckung des sogenannten Giant Magnetowiderstands (GMR) und des Tunnelmagnetowiderstands (TMR) ausgelöst. Diese beiden Effekte ermöglichten es erstmals, ein Magnetfeld, bzw. eine Magnetisierungsinformation direkt in eine Widerstandsänderung umzusetzen. Beide Effekte basieren auf dem Transport spinpolarisierter Elektronen zwischen zwei ferromagnetischen Kontakten, wobei die relative Magnetisierung der beiden Kontakte ausschlaggebend für den Widerstand des Gesamtbauelements ist. Der GMR wird hierbei in rein metallischen Strukturen und der TMR in Strukturen mit einer oxidischen Tunnelbarriere zwischen zwei ferromagnetischen Metallschichten genutzt. Zur Zeit werden TMR-Strukturen für elektronisch auslesbare Magnetspeicher MRAM verwendet, während der GMR kommerziell vor allem in der Magnetfeldsensorik und in Festplattenleseköpfen genutzt wird.

30 Beim GMR wird in einem rein metallischen Bauelement mit zwei ferromagnetischen Kontakten die Widerstandsänderung zwischen paralleler und antiparalleler Magnetisierung gemessen. Bei Anlegen eines externen Felds und damit paralleler Ausrichtung der Magnetisierungen in benachbarten ferromagnetischen
35 Schichten sinkt der Widerstand des Bauelements. Die Impedanz eines solchen Elements ist aufgrund der metallischen Leitfä-

higkeit schwer an Halbleiterschaltungen anzupassen. Zur Überführung der antiparallel ausgerichteten Magnetisierungen in einen Zustand mit paralleler Ausrichtung muss bei gekoppelten GMR-Strukturen die Stärke des externen Magnetfelds einen bestimmten Schwellenwert überschreiten. Dadurch lässt sich der GMR-Effekt durch sehr schwache Magnetfelder nicht mehr auslösen.

1999 gelang R. Fiederling, M. Keim, G. Reuscher, W. Ossau, G. Schmidt, A. Waag und L. W. Molenkamp (Nature 402, 787 bis 790 (1999)) der Nachweis der Injektion spinpolarisierter Elektronen in einen nichtmagnetischen Halbleiter durch Messung der zirkularen Polarisierung des von einer Licht emittierenden Diode erzeugten Lichts. Die Polarisierung der Elektronenspins wurde erreicht, indem die Elektronen über einen $\text{Be}_{0,07}\text{Mn}_{0,03}\text{Zn}_{0,9}\text{Se}$ -Halbleiterkontakt in einen GaAs-Halbleiter injiziert wurden. Durch Rekombination mit unpolarisierten Löchern, welche von der gegenüberliegenden Seite der Schicht des GaAs-Halbleiters injiziert wurden, wurde zirkular polarisiertes Licht erzeugt.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein magnetoresistives Halbleiterelement zur Verfügung zu stellen, welches den Nachweis auch sehr schwacher Magnetfelder ermöglicht, eine deutliche Änderung des Widerstands unter Einwirkung eines äußeren Magnetfelds zeigt (Steigerung von $\Delta R/R$) und eine hohe Sensitivität S aufweist ($S = \Delta R/R/\Delta H$).

Die Aufgabe wird gelöst durch ein magnetoresistives Halbleiterelement, umfassend einen ersten Kontakt und einen zweiten Kontakt, sowie eine zwischen dem ersten und dem zweiten Kontakt angeordnete Schicht eines nicht-magnetischen Halbleiters, wobei der erste Kontakt aus einem semimagnetischen Material besteht.

Die Änderung des Widerstands beruht auf der Injektion spinpolarisierter Elektronen in die zwischen den Kontakten angeordnete Schicht des nicht magnetischen Halbleiters. Im Gegensatz zum GMR-Effekt erhöht sich der Widerstand des Halbleiterelements unter Einwirkung eines externen Magnetfelds, es wird also ein positiver Magnetowiderstand gemessen, der bis zu 100 % betragen kann. Gemessen wird hierbei die Veränderung des Widerstands zwischen der Magnetisierung 0, d. h. ohne Einwirkung eines äußeren Magnetfelds, und gleichsinniger Magnetisierung der Spins im Kontakt aus dem semimagnetischen Material.

Unter einem semimagnetischen Material wird ein Halbleiter verstanden, welcher einen starken Paramagnetismus aufweist. Während in ferromagnetischen Materialien die Spins gekoppelt sind, also die Leitungselektronen bereits ohne Einwirkung eines äußeren Felds eine Polarisierung aufweisen, weist ein semimagnetisches Material ohne Einwirkung eines externen Magnetfelds unpolarisierte Leitungselektronen auf. Beim Anlegen eines externen Magnetfelds werden die Leitungselektronen des Materials spinpolarisiert. Die Spinpolarisation kann z. B. durch eine große Zeemanaufspaltung der elektronischen Niveaus hervorgerufen werden. Durch die starke Aufspaltung besetzen die injizierten Elektronen (bzw. Ladungsträger) das energetisch günstigere untere Zeeman-Niveau. Diese spinpolarisierten Elektronen werden anschließend in den nicht-magnetischen Halbleiter injiziert. Die Ausrichtung der Elektronenspins bleibt im nicht-magnetischen Halbleiter erhalten. Dies bewirkt eine Unterdrückung eines Spinkanals der Leitfähigkeit im nicht-magnetischen Halbleiter. Während ohne Spin-injektion der Strom im nicht-magnetischen Halbleiter von beiden Spino-rientierungen (parallel bzw. antiparallel bzw. Spin auf und Spin ab) zu gleichen Teilen getragen wird, müssen nun Elektronen einer Spinausrichtung den gesamten Strom tragen. Da deren Anzahl aber nicht nennenswert zunimmt, steigt der Widerstand. Man erhält einen positiven Magnetowiderstand. Ist

die Widerstandsänderung zumindest in der Größenordnung des Gesamtwiderstands des Bauelementes, so kann das magnetoresistive Halbleiterelement GMR- oder TMR-Strukturen in bestimmten Anwendungen ersetzen. Während für GMR und TMR jeweils zwei ferromagnetische Kontakte notwendig sind, ist bei dem erfindungsgemäßen magnetoresistiven Halbleiterelement lediglich ein Kontakt erforderlich, dessen Spins zueinander nicht gekoppelt sind, der also paramagnetisch ist und ohne Einwirkung eines äußeren Magnetfelds nicht magnetisiert ist. Das Material des zweiten Kontakts unterliegt zunächst keinen besonderen Beschränkungen. Es ist lediglich erforderlich, dass die Ladungsträger über den zweiten Kontakt wieder aus dem nicht magnetischen Halbleiter abfließen können.

Für die Schicht des nicht-magnetischen Halbleiters können prinzipiell alle nicht-magnetischen Halbleiter verwendet werden, z. B. (Gruppe IV) III/V und II/VI-Halbleiter. Besonders geeignet ist Silizium sowie Si/SiGe zweidimensionale Elektrogase, da diese eine geringe Spinsteuerung aufweisen und nur geringe Schwierigkeiten bei der Miniaturisierung des erfindungsgemäßen Halbleiterelements auftreten.

Als semimagnetischer Halbleiter können Materialien mit einem großen g-Faktor eingesetzt werden. Geeignet sind z. B. verdünnt magnetische II/VI-Halbleiter. Besonders geeignet sind ZnMnFe-Halbleiter. Die Spins des Mangans in undotierten oder n-dotierten ZnFe-(II/VI-Halbleitern) sind normalerweise antiferromagnetisch gekoppelt. Bei sehr niedrigen Mn-Konzentrationen und bei niedrigen Temperaturen führt die sp-d-Austauschwechselwirkung zu einem sehr großen g-Faktor, welcher den wirksamen Landéfaktor eines Elektrons in einem Halbleiter beschreibt, was zu einer sehr hohen Zeeman-Aufspaltung der Zustände führt. Die magnetischen Mn-Ionen lassen sich isoelektronisch in den Halbleiter einbauen, so dass sich die Leitfähigkeit sowie die Art der Ladungsträger (Elektronen oder Löcher) durch den Einbau einer weiteren Dotierung steu-

ern lässt. Weiter lassen sich auch III/V-Halbleiter verwenden, die z. B. GaMnAs in nicht ferro-magnetischer Phase, ferner auch schmalbandige Halbleiter wie InSb oder HgCdTe.

- 5 Der Grad der Polarisierung erhöht sich mit zunehmender Ausdehnung des ersten Kontakts aus dem semimagnetischen Material in Richtung des Ladungsflusses. Geeignete Stärken des ersten Kontakts liegen bevorzugt im Bereich von 50 bis 400 nm, vorzugsweise 50 bis 300 nm.

10

Der Aufbau des erfindungsgemäßen magnetoresistiven Halbleiterelements lässt sich in weiten Grenzen variieren, was dem Weg zu einer Vielzahl von Anwendungen öffnet.

- 15 Nach einer bevorzugten Ausführungsform ist zwischen dem ersten Kontakt aus dem semimagnetischen Material und der Schicht des nicht-magnetischen Halbleiters eine Tunnelbarriere angeordnet. Die Tunnelbarrieren können entweder aus Halbleitern bestehen, wie AlAs auf GaAs oder oxidisch sein, wie
20 z. B. Aluminiumoxid, Magnesiumoxid, Titanoxid, Siliziumoxid oder z. B. auch aus Siliziumnitrid bestehen.

- Der zweite Kontakt unterliegt an sich keinen besonderen Beschränkungen. Durch eine geeignete Wahl des Materials lassen
25 sich Bauelemente für spezielle Anwendungen entwickeln oder es lässt sich die beobachtete Änderung des Widerstands im externen Magnetfeld modifizieren.

- Nach einer bevorzugten Ausführungsform besteht der zweite
30 Kontakt aus einem nicht-magnetischen Material. Die Änderung des Widerstands im externen Magnetfeld wird dann nur durch die Polarisierung der in den Halbleiter injizierten Ladungsträger, insbesondere Elektronen, bewirkt.

- 35 Bevorzugt besteht der zweite Kontakt jedoch auch aus einem semimagnetischen Material. Da nach dem Durchtritt der spinpo-

larisierten Elektronen durch den nicht-magnetischen Halbleiter diese erneut auf einen spinpolarisierten Kontakt treffen, lässt sich die beobachtete Änderung des Widerstands verstärken. Der zweite Kontakt kann dabei aus den gleichen Materialien aufgebaut sein wie der erste Kontakt, es können jedoch auch unterschiedliche semimagnetische Materialien verwendet werden.

10 Nach einer bevorzugten Ausführungsform kann zwischen dem nicht-magnetischen Halbleiter und dem zweiten semimagnetischen Kontakt ebenfalls eine Tunnelbarriere angeordnet sein. Die Tunnelbarriere kann dabei aus den gleichen Materialien hergestellt sein, wie oben beschrieben.

15 Nach einer speziellen Ausführungsform des magnetoresistiven Halbleiterelements besteht der zweite Kontakt aus einem ferromagnetischen Material. Man erhält in diesem Fall ebenfalls ein Halbleiterelement mit einem positiven Magnetowiderstand. Die Kennlinie ist jedoch bis zum Erreichen der Koerzitivfeldstärke des Ferromagneten asymmetrisch. Hiermit lässt sich ein polaritätssensitiver Magnetfeldsensor herstellen. Auch hier können zwischen erstem Kontakt und nicht-magnetischem Halbleiter bzw. nicht-magnetischem Halbleiter und ferroelektrischen zweiten Kontakt jeweils Tunnelbarrieren angeordnet
25 sein.

Das erfindungsgemäße magnetoresistive Halbleiterelement lässt sich für eine Vielzahl von Anwendungen einsetzen. So kann ein Speicherelement erhalten werden, welches ein magnetoresistives Halbleiterelement umfasst, wie es oben beschrieben wurde, sowie ein benachbart zu diesem Element angeordnetes ferromagnetisches Element. Die Anordnung ist dabei so gewählt, dass sich der semimagnetische Kontakt im Streufeld des ferromagnetischen Elements befindet. Bei Drehung der Magnetisierung des
30 ferromagnetischen Elements um 90° erniedrigt sich der Widerstand des magnetoresistiven Halbleiterelements, da sich der
35

semimagnetische Kontakt dann nicht mehr im Streufeld des ferromagnetischen Elements befindet.

Das erfindungsgemäße magnetoresistive Halbleiterelement lässt sich auch als Feldeffekttransistor ausgestalten. Der erste Kontakt wirkt dabei als Sourceelektrode, der zweite Kontakt als Drainelektrode und im zwischen dem ersten Kontakt und dem zweiten Kontakt angeordneten nichtmagnetischen Halbleiter wird ein Leitungskanal ausgebildet. Der Leitungskanal lässt sich dann durch das Feld einer benachbart zum nichtmagnetischen Halbleiter angeordneten Gatelektrode beeinflussen. Mit einem derartigen Element ist zugleich eine Spin- und eine Ladungssteuerung möglich.

Weiter kann das magnetoresistive Halbleiterelement als Sensor für Magnetfelder eingesetzt werden. Bevorzugt ist dabei eine Ausführung als Lesekopf für magnetische Datenspeicher, wie z. B. Harddisks. Eine Vorrichtung zum Auslesen von in magnetischen Speichermedien gespeicherten Informationen umfasst dabei ein magnetoresistives Halbleiterelement wie es oben beschrieben wurde, eine elektrische Zu- und Ableitung zu dem ersten bzw, vom zweiten Kontakt sowie eine Messvorrichtung zur Messung der Änderung des Widerstands, die mit der Zu- und Ableitung verbunden ist.

Weiter ist auch eine Anwendung zur Bestimmung einer Spinausrichtung (z. B. in einem Quantenpunkt) durch Projektion des Spins auf die Quantisierungsrichtung des Halbleiters möglich. Der Quantenpunkt stellt hierbei den magnetischen Kontakt dar. Diese Anwendung ist insbesondere im Zusammenhang mit Quanten-Computing von Interesse.

Zu näheren Erläuterung des magnetoresistiven Effekts wird auf den beigefügten Artikel von G. Schmidt, G. Richter, P. Grabs, D. Ferand und L. W. Molenkamp verwiesen, der ebenfalls Teil dieser Anmeldung ist.

Die Erfindung wird unter Bezugnahme auf eine beigelegte Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt:

5 Fig. 1 eine Anordnung mit horizontaler Stromrichtung zwischen den Kontakten;

Fig. 2 eine Anordnung mit einer horizontalen Stromrichtung zwischen den Kontakten;

10 Fig. 3 eine Anordnung mit einer vertikalen Stromrichtung zwischen den Kontakten;

Fig. 4 eine Anordnung mit gemischter Stromrichtung zwischen den Kontakten;

Fig. 5 eine Seitenansicht (a) und eine Aufsicht (b) eines MRAM-Elements.

15

Die Anordnung aus Fig. 1 wird erhalten, indem auf einem isolierenden GaAs-Substrat 1 eine 500 nm starke Schicht eines n-dotierten (10^{19} cm^{-3}) $\text{Zn}_{0,97}\text{Be}_{0,03}\text{Se}$ -Halbleiters als nichtmagnetische Halbleiterschicht 2 abgeschieden wurde. Zur Herstellung der Kontakte 3, 4 wurde auf der Schicht des nichtmagnetischen Halbleiters 2 eine Schicht aus $\text{Zn}_{0,89}\text{Be}_{0,05}\text{Mn}_{0,06}\text{Fe}$ ($n = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) abgeschieden wurde.

25

Auf dieser semimagnetischen Schicht wurde eine Aluminiumschicht in einer Stärke von 100nm abgeschieden und auf dieser lithographisch Kontakte ($200\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$) definiert um einen Kontakt zu den semimagnetischen Kontakten herzustellen. Diese lithographisch definierten Kontaktflächen wurden dann als Ätzmaske für ein nasses chemisches Ätzen verwendet, bei dem der semimagnetische Halbleiter und etwa 10nm der Stärke des nicht magnetischen Halbleiters im unmaskierten Bereich entfernt wurden. In einem zweiten optischen lithographischen Schritt wurde ein erhöhter Bereich definiert, welche die beiden semimagnetischen Kontakte 3, 4 sowie die Schicht des zwischen den Kontakten 3, 4 angeordneten Halbleiters 2 umfasste.

35

Das diesen Bereich umgebende unmaskierte $\text{Zn}_{0,97}\text{Be}_{0,03}\text{Se}$ wurde

anschließend durch nasses chemisches Ätzen entfernt, so dass die in Fig. 1 gezeigte Anordnung erhalten wurde.

5 Eine ähnliche Struktur zeigt Fig. 2. In diesem Fall ist jedoch der nicht magnetische Halbleiter 2 in ein Halbleitersubstrat 1 implantiert.

10 Eine weitere Ausführungsform wird in Fig. 3 gezeigt. Hierbei ist der nicht magnetische Halbleiter 2 auf einem Halbleitersubstrat 1 angeordnet und der semimagnetische erste Kontakt 3 als Schicht auf dem nicht magnetischen Halbleiter ausgebildet. Der zweite Kontakt 4, der ebenfalls aus einem semimagnetischen Halbleiter oder auch aus einem nicht magnetischen Material bestehen kann, ist ebenfalls direkt auf dem Halbleitersubstrat 1 angeordnet. Der Ladungstransport erfolgt hierbei
15 durch das Halbleitersubstrat 1.

20 Eine weitere Ausführungsform, in der der Ladungstransport durch das Halbleitersubstrat 1 erfolgt, ist in Fig. 4 gezeigt. Dabei ist ein zweiter Kontakt 4, der aus einem semimagnetischen Material oder einem nicht magnetischen Material bestehen kann, auf dem Halbleitersubstrat 1 angeordnet. Auf dem zweiten Kontakt 4 ist eine Schicht aus einem nichtmagnetischen Halbleiter 2 angeordnet, auf dem eine weitere Schicht
25 aus einem semimagnetischen Halbleiter angeordnet ist, welcher den ersten Kontakt 3 bildet.

30 In Fig. 5 ist eine Anordnung gezeigt, wie sie für einen MRAM verwendet werden kann. In einem Substrat 1 ist ein nicht magnetischer Halbleiter 2 implantiert, der beispielsweise wie oben erwähnt aus $\text{Zn}_{0,97}\text{Be}_{0,03}\text{Se}$ gebildet sein kann. Auf dem nicht magnetischen Halbleiter 2 sind nebeneinander ein erster Kontakt 3 angeordnet, der beispielsweise aus $\text{Zn}_{0,89}\text{Be}_{0,05}\text{Ni}_{0,06}\text{Se}$ aufgebaut sein kann, sowie ein zweiter Kontakt 4, der aus einem nicht magnetischen Material oder ebenfalls aus einem semimagnetischen Material aufgebaut sein kann. Benachbart zum
35

ersten semimagnetischen Kontakt 3 ist ein ferromagnetisches Element 5 angeordnet, dessen Magnetisierungsrichtung verändert werden kann. Erster Kontakt 3 und ferromagnetisches Element 5 sind dabei so nahe beieinander angeordnet, dass der erste Kontakt 3 im Streufeld des ferromagnetischen Elements 5 liegt.

Die Funktion des MRAM ist in Fig. 5b dargestellt. Im Zustand mit einem hohen Widerstand liegt der erste Kontakt 3 im Streufeld der Magnetisierung 6 des ferromagnetischen Elements 5. In diesem Zustand werden spin-polarisierte Elektronen aus dem ersten Kontakt 3 in den nicht magnetischen Halbleiter 2 injiziert, so dass nur einer der Spinkanäle für den Ladungstransport genutzt werden kann. Die Vorrichtung zeigt daher einen erhöhten Widerstand. Wird die Magnetisierung 6 des ferromagnetischen Elements 5 um 90° gedreht (Magnetisierung 7), liegt der erste Kontakt 3 nicht mehr im Streufeld des ferromagnetischen Elements 5. Die vom ersten Kontakt 3 in den nicht magnetischen Halbleiter 2 injizierten Elektronen werden daher nicht mehr spin-polarisiert, weshalb für den Ladungstransport beide Spinkanäle im nicht magnetischen Halbleiter 2 genutzt werden können. Dadurch erniedrigt sich der Widerstand des Halbleiterelements.

AA

1. Welches technische Problem soll durch Ihre Erfindung gelöst werden?
2. Wie wurde dieses Problem bisher gelöst?
3. In welcher Weise löst Ihre Erfindung das angegebene technische Problem (geben Sie Vorteile an)?
4. Worin liegt der erfinderische Schritt?
5. Ausführungsbeispiel[e] der Erfindung.

Bekannter Effekt

Beim giant Magnetoresistance wird in einem rein metallischen Bauelement mit zwei ferromagnetischen Kontakten die Widerstandsänderung zwischen paralleler und antiparalleler Magnetisierung gemessen. Dieser Effekt ist negativ beim Anlegen eines externen Feldes. Die Impedanz eines solchen Elements ist aufgrund der metallischen Leitfähigkeit schwer an Halbleiterschaltungen anzupassen.

Neuer Effekt

Benutzt man Kontakte die nicht ferromagnetisch sondern stark paramagnetisch sind (im folgenden semimagnetisch genannt, zum Beispiel verdünnt magnetische Halbleiter), so ergibt sich durch Spininjektion ein positiver Magnetowiderstand, der bis zu 100 % betragen kann. Es wird hierbei der Unterschied zwischen Magnetisierung Null und gleichsinniger Magnetisierung bestimmt. Der Effekt existiert auch (wenn auch vermindert) mit nur einem magnetischen Kontakt. Er basiert auf der Unterdrückung eines Spinkanals der Leitfähigkeit im nichtmagnetischen Halbleiter. Da es sich um ein Halbleiterelement handelt ist die Integration unproblematisch.

Neues Halbleiterelement (1. Ausführungsform)

Halbleiterelement mit mindestens einem semimagnetischen Kontakt. Dieses weist einen positiven Magnetowiderstand im externen Magnetfeld auf, der durch die Injektion spinpolarisierter Elektronen in den nichtmagnetischen Halbleiter hervorgerufen wird. Das Halbleiterelement kann Magnetfelder detektieren und insbesondere auch in Zusammenhang mit einem Ferromagneten zur Informationsspeicherung verwendet werden.

Weiterbildungen

- 1) Nutzung zweier semimagnetischer Kontakte zur Erhöhung des Effektes.
- 2) Nutzung des Elements als Feldsensor analog zu einem GMR Element. Vorteil im Vergleich zu GMR: Ausgangszustand immer wohl definiert. Kein Exchangebias notwendig, keine antiferromagnetische Kopplung notwendig.
- 3) Mögliche Konfigurationen verschiedener Kontakte, die für Halbleiterelemente Verwendung finden können. Alle Kontakte sind Kontakte zum nichtmagnetischen Halbleiter.

- a) Ein semimagnetischer Kontakt, ein nichtmagnetischer Kontakt (wie 1. Ausführungsform)
 - b) Zwei semimagnetische Kontakte (wie Weiterbildung 1)
 - c) Ein semimagnetischer Kontakt, ein semimagnetischer Kontakt mit Tunnelbarriere
 - d) Zwei semimagnetische Kontakte mit Tunnelbarriere
 - e) Ein semimagnetischer Kontakt mit Tunnelbarriere, ein nicht magnetischer Kontakt.
- 4) Sonderfall: Ein semimagnetischer Kontakt und ein ferromagnetischer Kontakt ergibt ein Halbleiterelement mit positivem Magnetowiderstand. Die Kennlinie ist jedoch bis zum Erreichen der Koerzitivfeldstärke des Ferromagneten asymmetrisch. Hiermit lässt sich ein polaritätssensitiver Magnetfeldsensor herstellen. Auch hierbei sind für magnetischen und semimagnetischen Kontakt Konfiguration mit und ohne Tunnelbarriere entsprechend Weiterbildung 3 möglich.
- 5) Anwendung als Speicherelement (beispielsweise MRAM). Wird das Halbleiterelement so hergestellt, dass sich der semimagnetische Kontakt im Streufeld eines Ferromagnetischen Elements befindet, so erniedrigt sich der Widerstand des Halbleiterelements bei Drehung der Magnetisierung um 90° , da der Kontakt sich dann nicht mehr im Streufeld befindet.
- 6) Anwendung zur Bestimmung einer Spinausrichtung (zum Beispiel in einem Quantenpunkt, Stichwort Quantencomputing) durch Projektion des Spins auf die Quantisierungsrichtung des Halbleiters. Der Quantenpunkt stellt hierbei den magnetischen Kontakt dar.
- 7) Da es sich in den obengenannten Fällen um Kontakte auf Halbleitern handelt, können die Elemente um ein Gate zwischen den Kontakten erweitert werden, so dass sich Elemente ergeben, in denen zugleich Spin- und Ladungssteuerung möglich ist.

6. Zur weiteren Erläuterung sind als Anlagen beigefügt:

Blatt der Darstellung eines oder mehrerer Ausführungsbeispiele der Erfindung;
(falls möglich, Zeichnungen im PowerPoint- oder Designer-Format anfertigen)

14

Blatt zusätzliche Beschreibungen (z.B. Laborberichte, Versuchsprotokolle);

Blatt Literatur, die den Stand der Technik, von dem die Erfindung ausgeht, beschreibt; *)

sonstige Unterlagen (z.B. Disketten, insbesondere mit Zeichnungen der Ausführungsbeispiele):

*) Bitte Fotokopien oder Sonderdrucke aller zitierten Veröffentlichungen (Aufsätze vollständig; bei Büchern die relevanten Kapitel) mit vollständigen bibliographischen Daten beifügen.

Die Magnetoelektronik und der spinpolarisierte Transport haben im letzten Jahrzehnt eine rasante Entwicklung durchgemacht. Diese Entwicklung wurde vor allem durch die Entwicklung des sogenannten Giant Magnetowiderstandes und des Tunnelmagnetowiderstandes ausgelöst. Diese beiden Effekte ermöglichten es erstmals, ein Magnetfeld, bzw. eine Magnetisierungsinformation direkt in eine Widerstandsänderung umzusetzen. Beide Effekte basieren auf dem Transport spinpolarisierter Elektronen zwischen zwei ferromagnetischen Kontakten, wobei die relative Magnetisierung der beiden Kontakte ausschlaggebend für den Widerstand des Gesamtbauelements ist. GMR wird hierbei in rein metallischen Strukturen und TMR in Strukturen mit einer oxidischen Tunnelbarriere zwischen zwei ferromagnetischen Metallschichten genutzt. Zur Zeit werden ZMR Strukturen für elektronisch auslesbare Magnetspeicher MRAM verwendet, während GMR kommerziell vor allem in der Magnetfeldsensorik und in Festplattenleseköpfen genutzt wird.

Nachdem 1999 erstmals die Injektion spinpolarisierter Elektronen in einen Halbleiter anhand einer GaAs Leuchtdiode demonstriert wurde liegt es nahe, ähnliche Effekte auch in Halbleiterstrukturen zu nutzen. Neben der Hoffnung, unter Nutzung ferromagnetischer Elektroden einen GMR artigen Effekt in Halbleitern zu realisieren, gibt es jedoch noch eine weitere Möglichkeit. Bestimmte Materialien sind im Normalzustand nicht magnetisiert. Beim Anlegen eines äußeren Magnetfeldes zeigen sie jedoch einen starken Paramagnetismus und eine hohe Polarisation der Leitungselektronen. Ein typisches Beispiel hierfür sind verdünnt magnetische Halbleiter bei tiefen Temperaturen. Nutzt man ein solches Material als Kontakt auf einem Halbleiter, so werden beim Anlegen einer Spannung spinpolarisierte Elektronen in den Halbleiter injiziert. Während ohne Spininjektion der Strom im Halbleiter von beiden Spinorientierungen zu gleichen Teilen getragen wird, müssen nun Elektronen einer Spinausrichtung den gesamten Strom tragen. Da deren Anzahl aber nicht nennenswert zunimmt, steigt der Widerstand. Man erhält einen positiven Magnetowiderstand (im Gegensatz zu GMR, der ist negativ). Ist die Widerstandsänderung zumindest in der Größenordnung des Gesamtwiderstandes des Bauelementes, so ist dieses geeignet, GMR oder TMR Strukturen in bestimmten Anwendungen zu ersetzen. Während für GMR und TMR jeweils zwei ferromagnetische Kontakte notwendig sind, funktioniert der neue Effekt auch mit einem Kontakt der allerdings nicht ferromagnetisch sein darf.

Anmerkungen zu Zeichnungen:

(Fig 1-5)

14

Die Zeichnungen stellen verschiedene Varianten des Bauelementes dar.

Der erste (DMS) Kontakt ist immer der im Text als erster semimagnetischer Kontakt bezeichnete. Die Ausführungsformen unterscheiden sich dann durch horizontale (1+2) und vertikale (3) sowie gemischte (4) Stromrichtungen zwischen den Kontakten.

Die letzte Zeichnung stellt die Aufsicht und Seitenansicht für das MRAM Element dar. Der gestrichelte Pfeil zeigt die Magnetisierung für den niedrigeren Widerstand.

Materialien:

Der nichtmagnetische Halbleiter:

Prinzipiell alle nichtmagnetischen Halbleiter möglich. (Gruppe IV) III/V und II/VI. Besonders prädestiniert ist Silizium (sowie Si/SiGe zweidimensionale Elektronengase), da es eine geringe Spinstreuung aufweist und weniger Anforderungen an die Miniaturisierung stellt.

Semimagnetische Halbleiter (Beispiele):

Man können Materialien mit großem g-Faktor eingesetzt werden. Bekannt sind hierbei zur Zeit verdünnt magnetische II/VI (Beispiel ZnMnSe) und III/V-Halbleiter (GaMnAs in nicht ferromagnetischer Phase) (bei tiefen Temperaturen), außerdem schmalbandige Halbleiter wie InSb oder HgCdTe. Da in dieser speziellen Richtung bisher noch keine intensive Forschung betrieben wurde, steht zu erwarten, daß in Zukunft auch andere Materialien hierfür zur Verfügung stehen werden.

Semimagnetisch ist wie folgt zu definieren:

Ein Material, das ohne Anlegen eines externen Magnetfeldes unpolarisierte Leitungselektronen hat. Dies schließt im allgemeinen Ferromagneten aus. Bei Anlegen eines externen Magnetfeldes werden die Leitungselektronen des Materials spinpolarisiert. Dies sind die notwendigen Voraussetzungen. Die Spinpolarisation kann zum Beispiel durch eine große Zeemanaufspaltung der elektronischen Niveaus wie in ZnMnSe hervorgerufen werden.

✓

Tunnelbarrieren:

Tunnelbarrieren können entweder aus Halbleitern bestehen (z.B.: AlAs auf GaAs) oder oxidisch sein z.B.: Aluminiumoxid, MgO, Titanoxid, Siliziumoxid oder -nitrid.

15

1

Large magnetoresistance effect due to spin-injection into a non-magnetic semiconductor

G. Schmidt, G. Richter, P. Grabs, D. Ferrand, L. W. Molenkamp

Physikalisches Institut, Universität Würzburg, Am Hubland, 97074 Würzburg, Germany

Abstract

A novel magnetoresistance effect, due to the injection of a spin-polarized electron current into a non-magnetic semiconductor, is presented. The effect results from the suppression of a spin channel in the non-magnetic semiconductor and can yield a 100% increase in device resistance.

Semiconductor spintronics has gained a strong boost from the recent experimental demonstration of electrical spin injection into a non-magnetic semiconductor, using Dilute Magnetic Semiconductors (DMS) as spin-injecting contacts[1,2]. However, the practical implications of these achievements for utilizing spin injection in semiconductor circuits are still limited, since in both experiments the spin polarization of the current was detected via the circular polarization of the electroluminescence of a semiconductor LED, and no appreciable effect of the spin polarization on the resistance of the device could be observed. Evidently, such an effect would be extremely useful for the implementation of spin injection in semiconductor transport devices for memory and logic applications.

An obvious candidate for implementing a spin-dependent resistance in a semiconductor device is based on utilizing the Giant Magneto Resistance (GMR) effect, which is well known from all-metal ferromagnetic/non-magnetic multilayer devices[3,4]. However, the

16

2

practical realization of a semiconducting GMR device has proven to be difficult, mainly because the effect relies on utilizing ferromagnetic contacts. We now know [5] that spin-injection into semiconductors can only be achieved from a contact that has a similarly low conductance as the non-magnetic semiconductor, and a close to 100% spin-polarization. This excludes using ferromagnetic metals like Fe, Co, or Ni as contact materials. Although ferromagnetic semiconductors are a better match to these requirements, all practical materials so far are p-type conductors[6]. Injection of spin-polarized holes into a non-magnetic semiconductor leads to a rapid loss of spin polarization due to the strong spin orbit coupling in the valence band, making holes less suitable for spin-polarized transport over longer distances[7].

We have found that the tunable Zeeman-splitting in paramagnetic DMS allows for the realization of a novel magnetoresistance effect. The effect (a large positive magnetoresistance) is caused by the suppression of one spin channel in the non-magnetic semiconductor, and is thus of a fundamentally different nature than GMR. In this paper we describe the observation of the novel effect in an all-semiconductor heterostructure device, consisting of $\text{Zn}_{0.97}\text{Be}_{0.03}\text{Se}$ as the non-magnetic semiconductor and $\text{Zn}_{0.89}\text{Be}_{0.05}\text{Mn}_{0.06}\text{Se}$ as DMS contact.

Consider a device where a non-magnetic layer is fitted with two contacts which are either magnetized in parallel or non magnetized – but not ferromagnetic (Fig. 1). In such a device, the current will be either unpolarized (nonmagnetized contacts) or spin-polarized (magnetized contacts). In general, electrons with spin-up and spin-down each contribute one half of the conductivity of the non-magnetic semiconductor. A spin polarization of the

17

3

current will thus lead to a decrease of the conductance, since only one of the two 'spin-channels' is used, while the other one is suppressed. This effect may lead to a maximum increase of the resistance by 100% for full spin polarization of the current.

A more detailed modeling of the device resistance can be obtained using the local approach described in Ref. 5. From this we find that, much in contrast to GMR, a magnetoresistance effect still exists when the spacing of the contacts is larger than the spin flip length in the non-magnetic material. In this limit, the suppression of the spin channel occurs only over a distance of order of the spin flip length. We find that in a one dimensional device (fig. 1a) the resistance change is given by

$$\frac{\Delta R}{R_{sc}} = 2 \frac{\lambda_{dms}}{\sigma_{dms}} \frac{\sigma_{sc}}{x_0} \frac{\beta^2}{1 - \beta^2 - \frac{\lambda_{dms}}{\sigma_{dms}} \frac{\sigma_{sc}}{\lambda_{sc}} \frac{1 + e^{\frac{x_0}{\lambda_{sc}}}}{1 - e^{\frac{x_0}{\lambda_{sc}}}}} \quad (1)$$

where λ_{dms} , λ_{sc} , σ_{dms} , σ_{sc} , are the spin flip length and the conductivity in the DMS and the nonmagnetic semiconductor respectively, x_0 is the spacing between the contacts and β is the degree of spin polarization in the bulk of the contacts. R_{sc} is given by $x_0 \sigma_{sc}$.

Evidently, II-VI DMSs are good candidates for the contacts in the device described above. They are ideally suitable for spin injection experiments, as was demonstrated in [1]. They can be obtained as n-type material and they exhibit an electron spin polarization close to 100% when an external magnetic field is applied[8]. For an experimental demonstration of the novel magnetoresistance effect, we have used II-VI-semiconductor multilayer structures, consisting of a highly n-doped (10^{19}cm^{-3}) $\text{Zn}_{0.97}\text{Be}_{0.03}\text{Se}$ layer (thickness 500

18

4

nm) as a non-magnetic semiconductor, contacted by the DMS $\text{Zn}_{0.89}\text{Be}_{0.05}\text{Mn}_{0.06}\text{Se}$ ($n=5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, various thickness), grown on an insulating GaAs substrate. Contact pads ($200 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$) positioned at various spacings were defined lithographically in a 100 nm Al layer, which was deposited on top of the semiconductor stack to provide an ohmic contact to the DMS. These pads were then used as an etch mask for wet chemical etching, removing the magnetic semiconductor and some 10 nm of the $\text{Zn}_{0.97}\text{Be}_{0.03}\text{Se}$ in the unmasked area. In a second optical lithography step, a mesa area including two of the DMS contact pads was defined, and the surrounding $\text{Zn}_{0.97}\text{Be}_{0.03}\text{Se}$ was removed by wet chemical etching. The resulting structure is drawn schematically in fig. 1b[9].

The magnetoresistance of several structures was measured at 4.2K and at magnetic fields between 0 and 7 T, using a dc voltage bias of 100 μV . Care was taken to ensure that the data were within the regime of linear response. All $\text{Zn}_{0.89}\text{Be}_{0.05}\text{Mn}_{0.06}\text{Se} / \text{Zn}_{0.97}\text{Be}_{0.03}\text{Se}$ hybrid structures exhibited a strong positive magnetoresistance, typical traces of which are shown in Fig. 2 a and b. The maximum change in resistance is up to 1.4 Ω , with a total device resistance of 20.5 Ω . After subtracting the contact resistance of 2 Ω , a lower limit for the relative change in resistance can be estimated as $\Delta R/R = 8\%$. The resistance saturates at fields between 1 and 2 T, and the effect is independent of the orientation of the magnetic field. Reducing the DMS thickness from 200 (fig. 2a) to 100 nm (fig. 2b) results in a reduction of the effect by a factor of 3. This observation can be understood by realizing that, due to the finite spin scattering length in the DMS, a thinner DMS layer results in a lower degree of spin polarization. A sample without DMS contact showed - within an experimental accuracy of 0.2% - no magnetoresistance.

19

5

The high dopant concentration in our layers was chosen to ascertain that the intrinsic magnetoresistance of the DMS is negative. At lower n (but above the metal-insulator transition), DMSs show an additional positive magnetoresistance due to the e-e correction to the conductivity. This correction vanishes with increasing n , according to $(k_F l)^{-3/2}$ [10], where k_F is the wavevector at the Fermi energy and l is the mean free path of the electron. That we are indeed in the limit where only the weak localization correction to the conductivity remains is evidenced by the small negative magnetoresistance (2%) of a sample consisting only of DMS (fig. 3). Note that because of the mainly perpendicular current through the DMS layer (fig. 4, cf. the discussion below) and the relatively large distance between the contact pads, the contribution of the DMS to the total device resistance is quite small, typically less than 1%. Given the small magnetoresistance measured for both bulk materials (fig. 2c and 3), we conclude that our experimental data on the multilayer samples directly evidence that we have succeeded in observing the novel, spin-injection-induced, magnetoresistance effect described above.

We have performed two-dimensional simulations of the current flow in our devices using a finite difference Poisson solver, incorporating the model of Ref. 6. We find that the current flow through the DMS is more or less vertical, whereas the current through the underlying non-magnetic material is mainly horizontal, resulting in a large voltage drop in this layer (Fig. 4). The homogeneous current distribution in the DMS results from the high interface resistance between the metal contacts and the DMS ($10^{-4} \Omega\text{cm}^2$). Note that the main voltage drop occurs in the $\text{Zn}_{0.97}\text{Be}_{0.03}\text{Se}$ *underneath* the DMS. In the simulations, the conductivities of the materials were taken as measured ($\text{Zn}_{0.89}\text{Be}_{0.05}\text{Mn}_{0.06}\text{Se}$: 100 S/cm,

2

6

$\text{Zn}_{0.97}\text{Be}_{0.03}\text{Se}$: 300 S/cm); the spin flip lengths used were 40 nm ($\text{Zn}_{0.89}\text{Be}_{0.05}\text{Mn}_{0.06}\text{Se}$) and 400 nm ($\text{Zn}_{0.97}\text{Be}_{0.03}\text{Se}$); the bulk spin polarization of the DMS was taken as 99.99% (justified by the large Zeeman splitting of 20 meV[11] at 7 T and the small kT of 0.4 meV). Because of numerical constraints, the values quoted should only be regarded as an indication of the actual parameters inside the device. However, using these parameters, we could reproduce the experimentally observed magnetoresistance and understand the device behaviour, including its scaling behaviour. For example, we have also investigated the magnitude of the effect for a sample with a 100 nm thick DMS in dependence of the spacing between the contacts. Experimentally, we find that with increasing spacing the absolute value of the positive magnetoresistance decreases from 0.48 Ω (10 μm) over 0.4 Ω (20 μm) to 0.35 Ω (30 μm). This effect is reproduced by our simulations; the increased contact spacing leads to a slight reduction of the spin injection efficiency and of the change in device resistance. From these simulations we conclude that the experiments clearly indicate efficient spin injection from the $\text{Zn}_{0.89}\text{Be}_{0.05}\text{Mn}_{0.06}\text{Se}$ into the non-magnetic $\text{Zn}_{0.97}\text{Be}_{0.03}\text{Se}$ layer. Note that in contrast to Ref. 1,2 the data presented here were all taken in the regime of linear response. They represent a very strong evidence for the single-particle character of the electrical spin injection from a DMS and confirm the validity of Ref. 5 in describing the injection phenomena.

At the same time our data demonstrate a new magnetoresistance effect which was predicted by our modeling and which (in an ideal case) can be as large as 100%. The results illustrate a viable route towards a straightforward determination of spin polarization in semiconductor devices. Using spin dependent resistance effects spin controlled

21

7

programmable logic may become feasible; other applications could be in read-in and read-out mechanisms for solid state quantum-computing with spins.

22

8

List of figures:

Fig. 1:

Idealized one-dimensional structure consisting of a non magnetic semiconductor with two attached DMS contacts. (b) Spin injection device used in the experiment consisting of a non-magnetic semiconductor layer with two DMS top-contacts.

Fig. 2:

Change of total resistance plotted over the magnetic field for three different devices. 1653 (b) and 1654 (a) are spin injection devices with DMS thickness of 100 and 200 nm, respectively. The zero field resistance is 15Ω (1653) and 20.5Ω (1654). The magnetoresistance increases by a factor of 3 when the DMS thickness is doubled. 1652 (c) is a reference device without DMS ($R_0=14 \Omega$). The magnetoresistance is less than 0.02Ω .

Fig. 3:

Longitudinal magnetoresistance of a single layer of highly n-doped ($n=5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) $\text{Zn}_{0.89}\text{Be}_{0.05}\text{Mn}_{0.06}\text{Se}$ measured in a Hall bar geometry. The magnetoresistance is negative and the relative change is approx. -2%. This material is identical to that used as spin injector in the multilayer device

Fig. 4:

Numerical simulation of the spin-polarization of the absolute value of the current ($|j_{\uparrow}| - |j_{\downarrow}| / (|j_{\uparrow}| + |j_{\downarrow}|)$) in a structure of 3600 nm length and 600 nm height (For symmetry reasons, only half of a complete device was simulated). (a) shows the situation without external voltage, (b) with an applied voltage. The arrows indicate the direction and magnitude of the

23

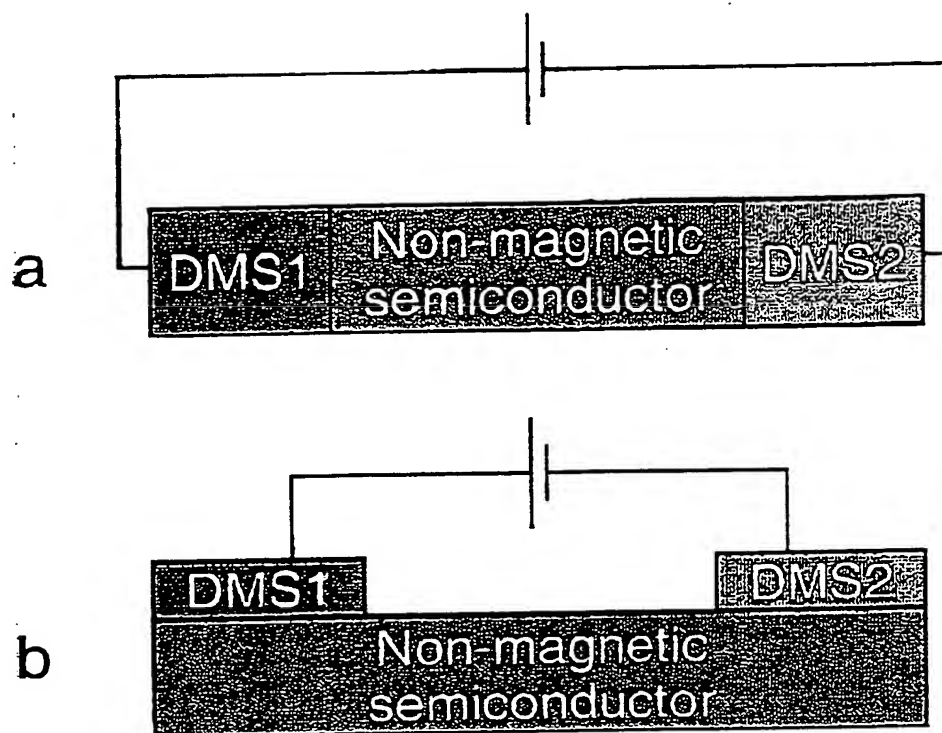
9

current. At the places where perpendicular currents occur (left boundary, right boundary of the contact) spin-injection is drastically increased and regions of much higher spin-polarization extend into the non-magnetic material.

24

10

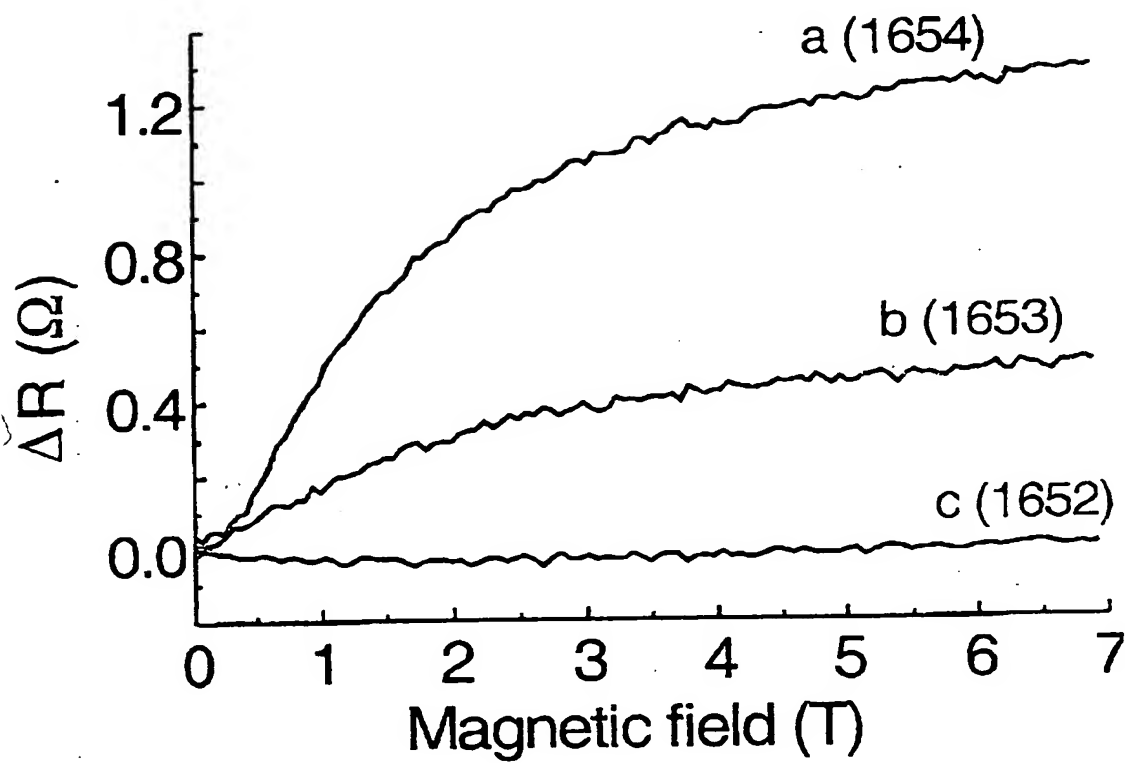
Fig. 1, Schmidt et al.



25

11

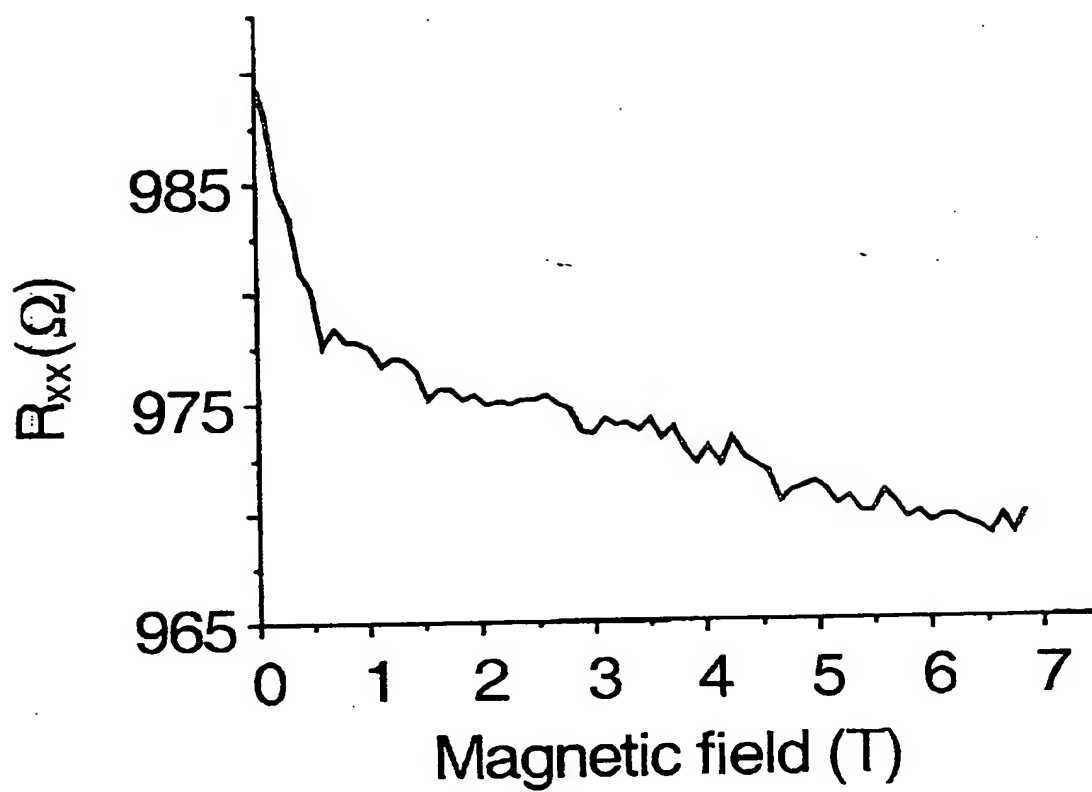
Fig. 2, Schmidt et al.



26

12

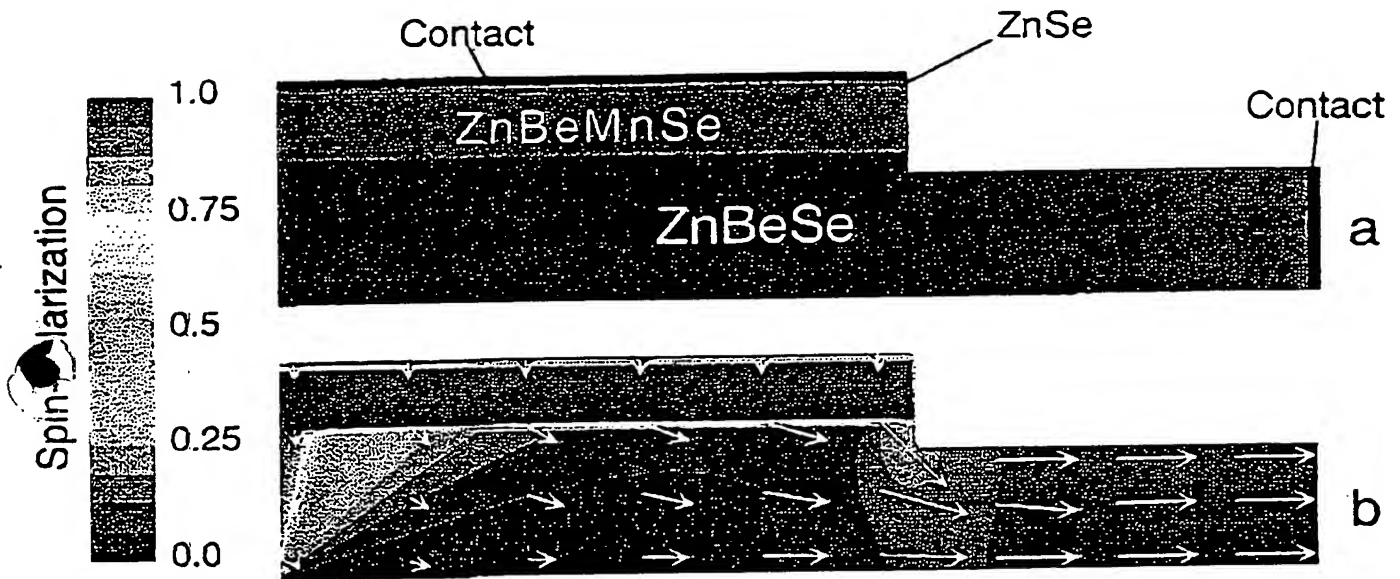
Fig. 3, Schmidt et al.



27

13

Fig. 4, Schmidr et al.



28

14

References:

1. R. Fiederling et al., NATURE 402, 787-790 (1999)
2. Y. Ohno et al., NATURE 402, 790-792 (1999)
3. M. N. Baibich et al., Phys. Rev. Lett. 61, 2472-2475 (1988)
4. G. Binasch, P. Grünberg, F. Saurenbach, W. Zinn, Phys. Rev. B 39, 4828-4830 (1989)
5. G. Schmidt, D. Ferrand, L. W. Molenkamp, A. T. Filip, B. J. van Wees, Phys. Rev. B 62, R4790-R4793 (2000)
6. F. Matsukura, H. Ohno, A. Shen, Y. Sugawara, Phys. Rev. B 57, R2037-R2040 (1998)
7. Nonetheless, efficient spin-polarized tunneling of holes through a 2.8 nm thick AlGaAs barrier has been demonstrated recently, cf. D. Chiba, N. Akiba, F. Matsukura, Y. Ohno, H. Ohno, Appl. Phys. Lett 77, 1873-1875 (2000)
8. J. K. Furdyna, J. Appl. Phys. 64, R29-R64 (1988)
9. For technological reasons, an exact realization of the one-dimensional device in fig. 1a is not feasible; the main problem is the high contact resistance between Al and the II-VI compounds.
10. M. Sawicki, T. Dietl, Proceedings of the 19th international conference on the physics of semiconductors, 1217-1220 (Publisher: Institute of Physics, Polish academy of sciences, Warsaw, Poland 1979)
11. J. A. Gaj, R. Planel, G. Fishman, Solid State Comm. 29, 435-438 (1979)

Patentansprüche

1. Magnetoresistives Halbleiterelement, umfassend einen ersten Kontakt und einen zweiten Kontakt, sowie eine zwischen
5 erstem und zweitem Kontakt angeordnete Schicht eines nicht magnetischen Halbleiters, wobei der erste Kontakt aus einem semimagnetischen Material besteht.
2. Magnetoresistives Halbleiterelement nach Anspruch 1, wobei
10 bei zwischen erstem Kontakt und der Schicht des nicht magnetischen Halbleiters eine Tunnelbarriere angeordnet ist.
3. Magnetoresistives Halbleiterelement nach Anspruch 1 oder
15 2, wobei der zweite Kontakt aus einem nicht magnetischen Material besteht.
4. Magnetoresistives Halbleiterelement nach Anspruch 1 oder
20 2, wobei der zweite Kontakt aus semimagnetischen Material aufgebaut ist.
5. Magnetoresistives Halbleiterelement nach Anspruch 4, wobei
25 bei zwischen dem zweiten Kontakt aus einem semimagnetischen Material und der Schicht aus dem nicht magnetischen Halbleiter eine Tunnelbarriere vorgesehen ist.
6. Magnetoresistives Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 oder 2, wobei der zweite Kontakt aus einem ferroelektrischen Material aufgebaut ist.
7. Magnetoresistives Halbleiterelement nach Anspruch 6, wobei
30 bei zwischen dem zweiten Kontakt aus einem ferroelektrischen Material und der Schicht aus dem nicht magnetischen Halbleiter eine Tunnelbarriere vorgesehen ist.

8. Magneto-resistives Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei das semimagnetische Material ein II-IV Halbleiter ist.

5 9. Magneto-resistives Halbleiterelement nach Anspruch 8, wobei der II-VI Halbleiter $\text{Be}_x\text{Nn}_y\text{Zn}_{1-x-y}\text{Se}$ ist mit $0 < x < 1$, $0 < y < 1$ und $0,0001 < y < 0,2$.

10 10. Speicherelement umfassend ein magneto-resistives Halbleiterelement gemäss einem der Ansprüche 1 bis 9 und ein benachbart zum ersten Element angeordnetes ferromagnetisches Element.

15 11. Feldeffekttransistor mit einer Source-Elektrode, einer Drain-Elektrode, einer Gate-Elektrode und einem zwischen Source- und Drain-Elektrode angeordnetem nicht magnetischen Halbleiter, wobei die Source-Elektrode aus einem semimagnetischen Material aufgebaut ist.

20 12. Vorrichtung zum Auslesen von in magnetischen Speichermedien gespeicherten Informationen umfassend ein magneto-resistives Halbleiterelement nach einem der Ansprüche 1 bis 9, elektrischen Zu- und Ableitungen zum ersten und zweiten Kontakt sowie einer mit den Zu- und Ableitungen verbundenen
25 Messvorrichtung zur Änderung des elektrischen Widerstandes.

Zusammenfassung

Die Erfindung betrifft ein magnetoresistives Halbleiterelement, umfassend einen ersten Kontakt und einen zweiten Kontakt, sowie eine zwischen erstem und zweitem Kontakt angeordnete Schicht eines nicht magnetischen Halbleiters, wobei der erste Kontakt aus einem semimagnetischen Material besteht. Als semimagnetisches Material werden stark paramagnetische Materialien verwendet, deren Spins ohne eine Wirkung eines äusseren Feldes keine Kopplung aufweisen. Unter Einwirkung eines äusseren Feldes werden die Elektronen im ersten Kontakt spin-polarisiert. Dadurch kann im nicht magnetischen Halbleiter nur noch einer der Spinkanäle für den Transport der Ladungsträger verwendet werden, so dass ein positiver magnetoresistiver Effekt erhalten wird.

1/3

Fig
Zeichnung 1

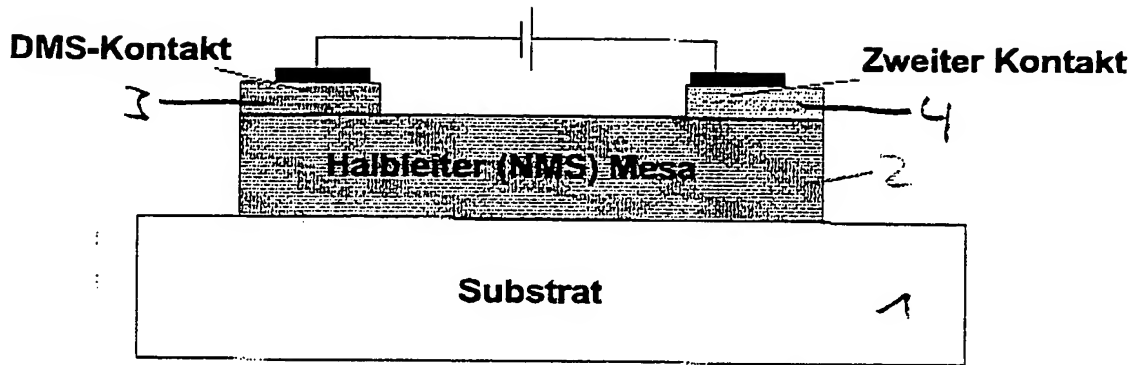
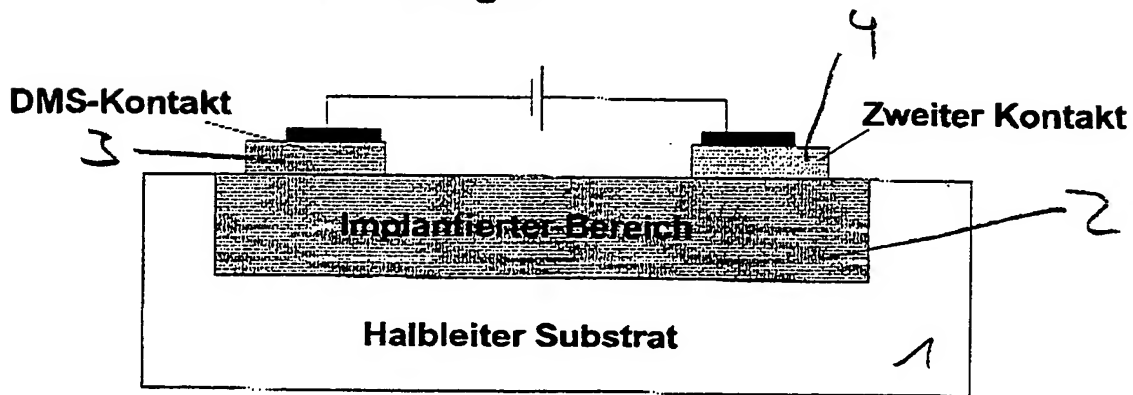


Fig
Zeichnung 2



2/3

Fig
Zeichnung 3

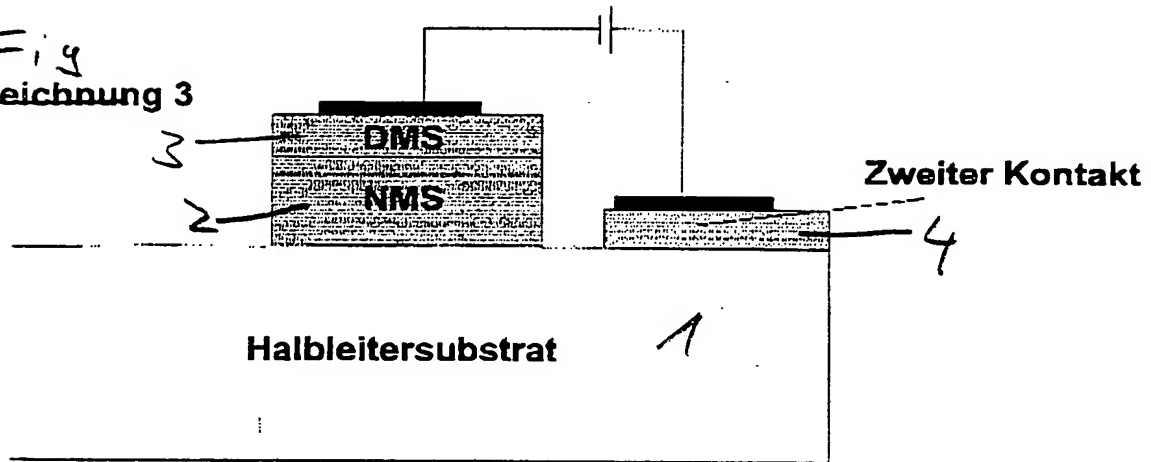
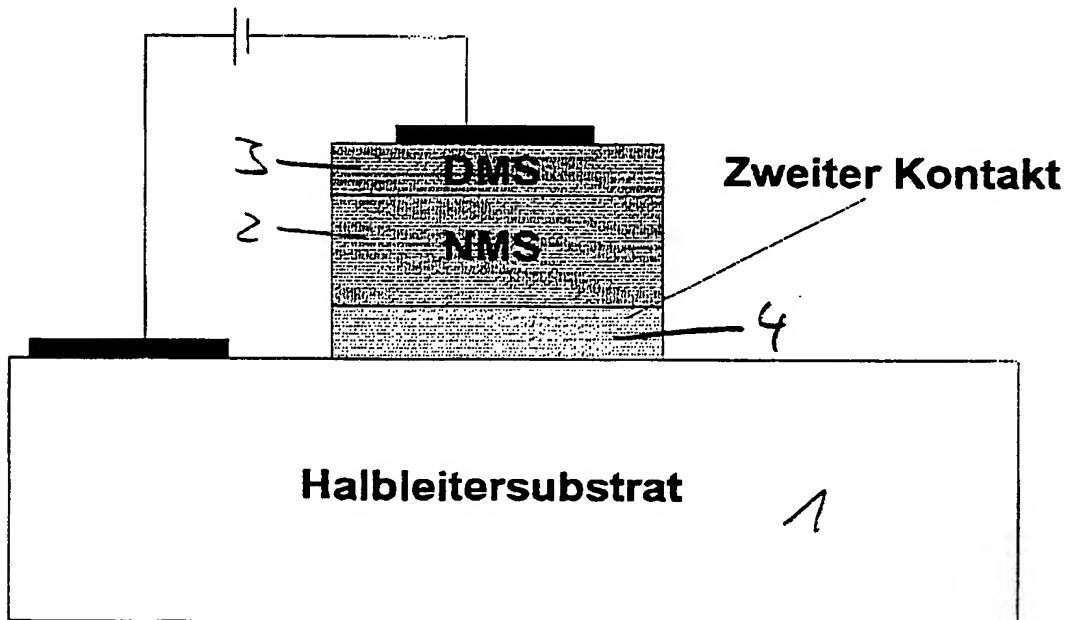


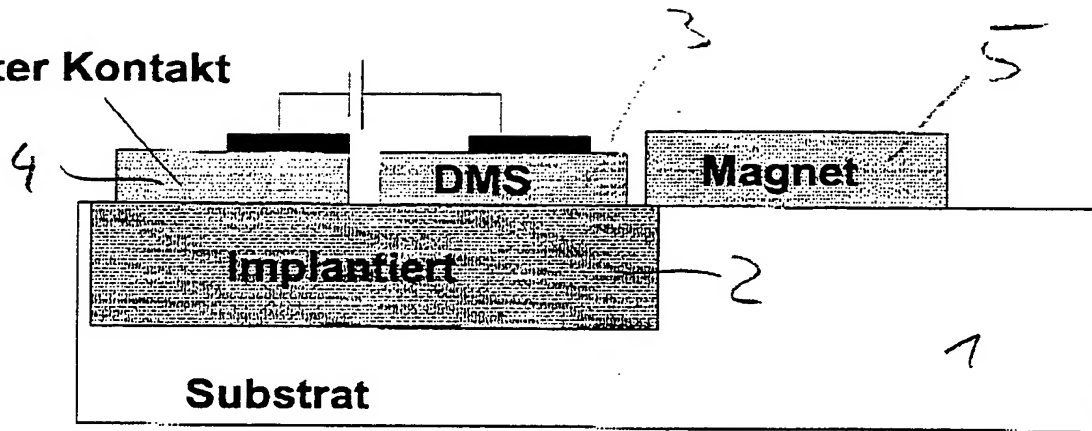
Fig
Zeichnung 4



+49 931 8885142

3/3

Zweiter Kontakt

Fiz
Zeichnung 5